

NMRI

第75回実海域推進性能研究会

特別講演:水槽試験技術  
第1部:水槽試験および実船の計測技術について

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所  
海上技術安全研究所流体設計系  
星野 邦弘

NMRI

### 発表内容

水槽試験および実海域における計測技術について紹介する。

1. [流場計測] 新しい流場計測技術  
マイクロバブルをトレーサーとするSPIV法  
風洞試験（気流の計測）、運動立体視  
実船計測等
2. [波浪計測] レーザーライトシート光を用いた線計測
3. [波浪計測] 船側波形のリアルタイム動的計測
4. [その他の計測技術]  
レーザーレーダ、固・液混相流の計測  
離着陸橋操船支援等、屈折率整合
4. [これから] 多次元高精度水槽（3次元空間+時間）

2

NMRI

### 定量可視化工学の背景と進歩

1. 定量化の困難さとその解決
  - ・流体計測分野における可視化手法（最近までの評価）  
定量化の困難さ → 定性的で補助的な研究手段
  - ・PTV(Particle Tacking Velocimetry)やPIV(Particle Image Velocimetry)の研究開発により解決
2. 流体現象に対する問題意識の複雑化
  - ・乱れの組織構造の計測等、従来の計測技術では限界のある流体現象の計測が要求される。
  - ・時間的空間的広がりを持った領域内の物理量を非接触でかつ同時計測ができる。

3

NMRI

### 【流場計測】PIVの基礎

第1画像  $t = t_0$   $p$   $q$

第2画像  $t = t_0 + \tau$   $q(ks, ls)$   $p(0, 0)$

相互相関関数の計算  $R_{pq}(k, l)$

最大値  $R_{pq}(ks, ls)$

速度ベクトル  $\vec{V}$

$$R_{pq}(k, l) = \frac{\sum_{i=1}^m (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\left( \sum_{i=1}^m (f_i - \bar{f})^2 \cdot \sum_{i=1}^m (g_i - \bar{g})^2 \right)^{1/2}}$$

NMRI

### 【流場計測】PIVの適用例

(気流)コンテナ船の積み付けによる流場の変化

【可視化手法】

舞台照明用フォグマシンを使用(安価 4千円位)  
照明: 150mWのグリーンレーザー(小出力ながら高輝度を実現)  
MEMSミラーを使ってスリット(水平断面、垂直断面)を作成。

動画

5

NMRI

### 【流場計測】PIVの適用例

(気流)コンテナ船の積み付けによる流場の変化

6

### 【流場計測】PIVの適用例

Figure showing PIV application examples. The top left image shows a flow visualization in a tank with green laser sheets. The top right image shows a velocity vector field. The bottom left image shows a velocity vector field with a red arrow indicating flow direction. The bottom right image shows a flow visualization in a tank with green laser sheets.

### 【流場計測】マイクロバブルPIV

PIV(粒子画像流速測定法)等の可視化計測を行う場合、流体中に目印となるトレーサを注入する必要がある。一般的には固体粒子のトレーサが用いられる。

- 固体粒子は散布後、回収することが困難
- 水槽保守や精度管理の観点から固体粒子の水槽への散布には問題

↓

固体粒子とは異なり水槽中に残留することのないマイクロバブルをトレーサとして利用

### 【流場計測】マイクロバブルPIV

マイクロバブルの特徴

- 気泡寿命が長い
- 上昇速度が遅い
- 気泡同士が結合し難い

発生したマイクロバブル(動画)

### 【流場計測】マイクロバブルPIV

平水中

### 【流場計測】マイクロバブルPIV

波浪中

波浪中( $\lambda/L=0.4$ )      波浪中( $\lambda/L=1.1$ )

### 【流場計測】マイクロバブルPIV

解析結果

### 【流場計測】PIV実船では？

例えば海面上の泡立ちをトレーサとして

動画

t=0秒

t=1秒

t=2秒

加納、星野 特許登録番号: 4677637  
「船用対水速度計測装置」

13

### 【流場計測】PIV実船では？

85時刻2.8秒間の平均速度と速度乱れ度

平均速度

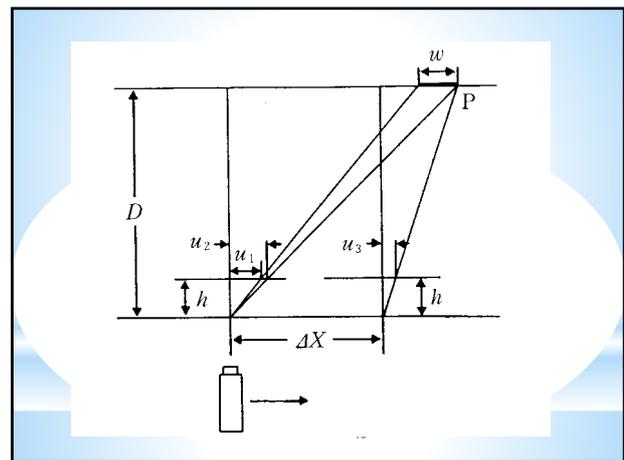
速度乱れ度

14

### 両眼立体視と運動立体視

距離  $\Delta X$  (m) 離して設置された左右2つのカメラの間を1つのカメラが一定速度  $V$  (m/sec) で並進する。2台のカメラが捉えた対象物の視差  $\Delta u = (u_2 - u_1)$  (m) と運動するカメラが捉えた物体のオプティカルフロー速度  $v$  (m/sec) は次のような関係式で与えられる。  
 $v = \Delta u / \Delta t = \Delta u (\Delta X / V)$   
 ここで  $\Delta t$  はカメラが  $\Delta X$  (m) 移動するに要する時間である。物体の撮像素子面上の  $v$  あるいは  $\Delta u$  が求まると、三角測量の原理に基づいて対象物体の  $p$  の奥行き  $D$  (m) は次式のように決定される。  
 $D = h \cdot (\Delta X / \Delta u) = h \cdot (V / v)$   
 ここで  $h$  はレンズの焦点距離である。この式を運動立体視のオプティカルフロー  $v$  (pixel/frame)、両眼立体視の視差  $\Delta u$  (pixel) および画像フレーム数  $\Delta t$  (frame) を用いて表現すると  
 $\Delta u = \Delta u / I$   
 $\Delta t = \Delta t / F$   
 ここに、 $F$  (frame/sec) は動画のサンプリング周波数(1秒当たりのフレーム枚数)、 $I$  (pixel/m) はカメラ撮像素子の1画素の寸法の逆数である。上式より  
 $D = h \cdot (V / v) \cdot (I / F)$   
 と表せる。以上の式より奥行き  $D$  は視差  $\Delta u$  やオプティカルフロー速度  $v$  の逆数の関係にある。

15



### 円形シフト法による計測

1. 複眼立体視 (ステレオ視) による計測法の問題
  - ・ 画像間で個々のトレーサを対応付けることが難しい。
  - ・ 粒子の重なり合いがあると計測できない。
2. 円形シフト法
 

原理は、運動立体視と2次元PTVを組み合わせたものである。カメラの高速回転は不可能であるので替わりに屈折レンズを回転させる。

TVカメラの回転

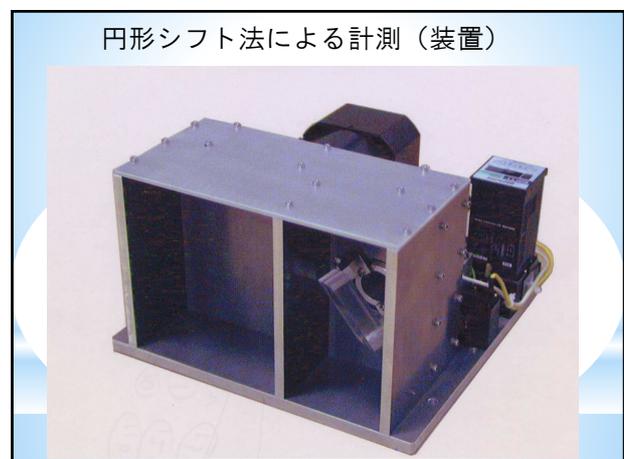
トレーサ粒子

近くにある粒子 (大きい円)

遠くにある粒子 (小さい円)

$$D = \frac{f \cdot \Delta x}{r}$$

16



### 円形シフト法による計測 (計測)

TVカメラの回転

トレーサ粒子

近くにある粒子 (大きい円)

遠くにある粒子 (小さい円)

$$D = \frac{f \cdot \Delta x}{r}$$

SP 0:00:07

### 水中3次元形状計測システムの開発

沈没船

ROV

海洋部門  
 深海技術研究グループ  
 運航・システム部門

星野 邦弘  
 田村 兼吉

### 現状の水中計測技術

易

↑

技術的

難

↓

難

船上観測

ROV・AUV

マルチナロービーム音響測深

TVカメラ

サイドスキャナー

ステリカメラ

2Dモザイク技術

### 現状の水中計測技術とその特徴

#### 可視TV画像

- 「目で見る」
- 最も基本的な調査・研究方法
- 減衰が大きい

水深0m

水深55m

可視光波長分布の水深による変化

### 開発した計測法

#### (1) レーザードットパターン投影法

水中で減衰の少ない緑色レーザー

(回折格子) (ドットマトリックスパターン)

水深0m

水深55m

#### (2) 複数ラインCCDセンサーを用いたレーザービーム・スキャニング法

エリアCCDセンサーを使う計測法に対して空間分解能で1桁から2桁以上の精度の向上が可能(特許出願中:2004-042960)

### ドットマトリックス投影法

沈船

ROV (遠隔操縦TVカメラ)

トランスポンダ

母船

遠隔操縦 ↓ ↑ 画像データ ↑ RTV位置検出

ROV

トランスポンダ

レーザードットパターン投影装置

ステレオ撮影用カメラ

演算

トランスポンダを海底に投下してROVの位置検出を行う。

### ドットマトリックス投影法

Input laser beam  $\phi=1\text{mm}$

GIFT Beam expander  $V=7.14X$

Orthogonal Micro lens array  $F=0.5\text{mm}$

Fine lens  $F=30\text{mm}$

Array of circular holes  $F=0.5\text{mm}$

レンズ光学系

多点スポット光

物体への投影

### 空中3次元計測結果

実験装置概観

計測結果

### ラインCCDを用いた3次元計測

エリアCCD

ラインCCD

球面レンズによる集光

シリンダリカルレンズによる集光

### 3次元計測システム計測原理

ラインCCD-C 計測エリア

ラインCCD-L 計測エリア

ラインCCD-R 計測エリア

レーザスポット

シリンダリカルレンズ

シリンダリカルレンズ

シリンダリカルレンズ

ラインCCD-L

ラインCCD-C

ラインCCD-R

強度強度曲線

強度強度曲線

強度強度曲線

$X_L$

$Y_C$

$X_R$

### 【MEMS共振ミラー】

MEMS共振ミラー

グリーンレーザー

ミラー

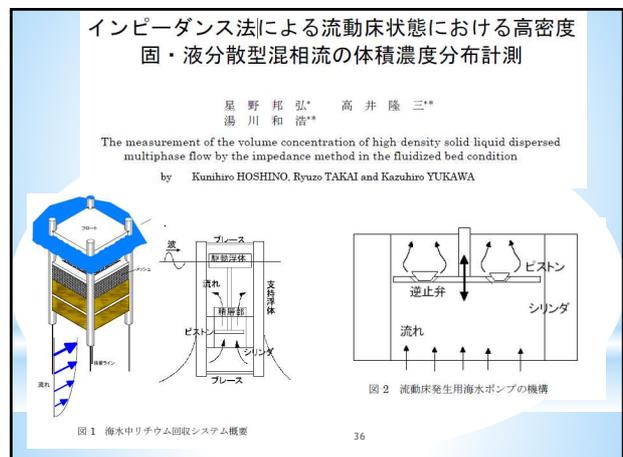
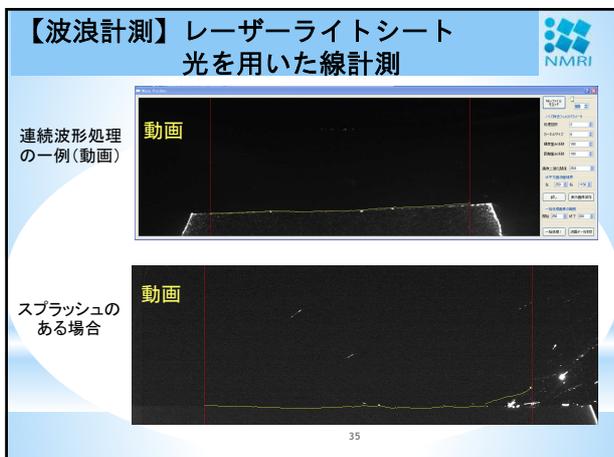
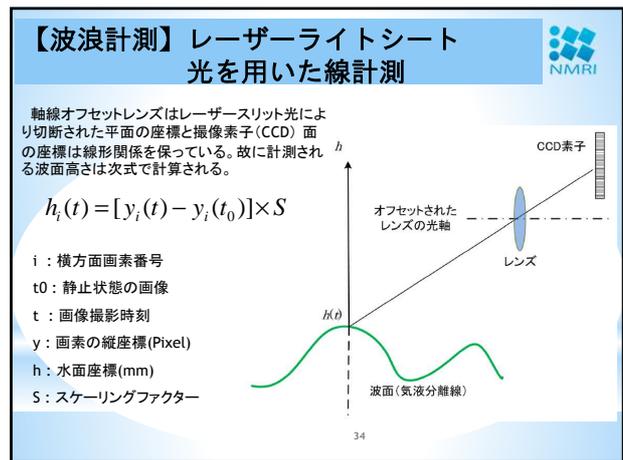
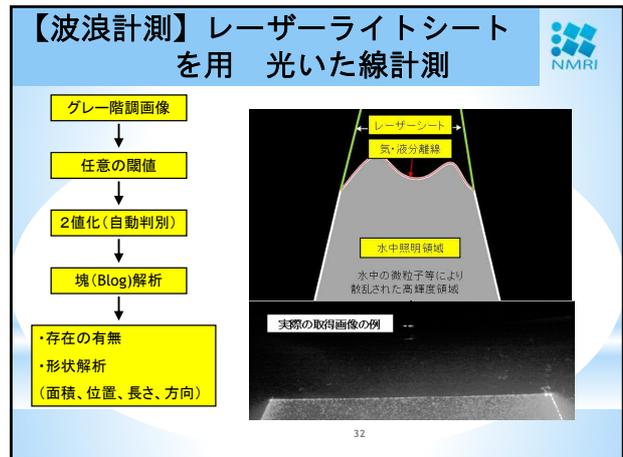
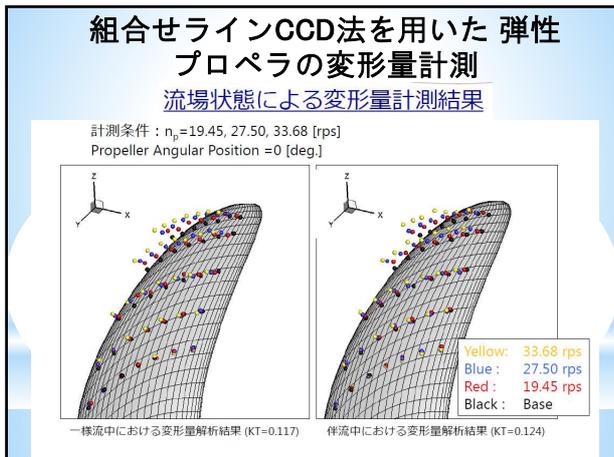
0.007秒間

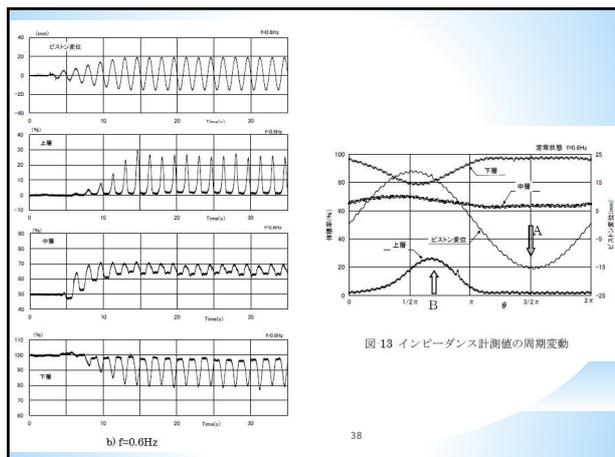
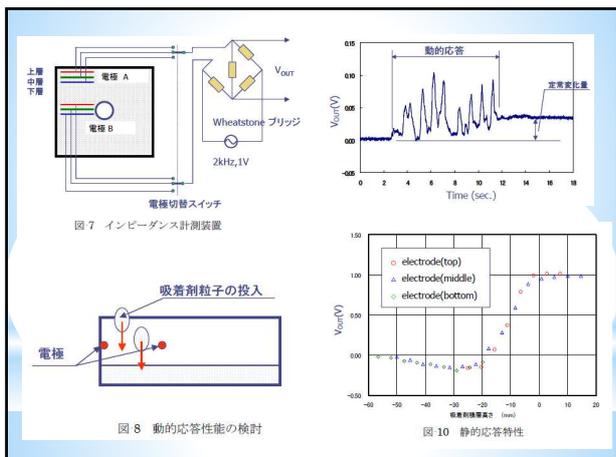
0.143秒間

### 組合せラインCCD法を用いた弾性プロペラの変形量計測

1. 計測対象となる物体へレーザーを照射する
2. 3台のカメラから得られた画像から、輝度分布のピーク座標を検出する
3. 三角測量の原理を適用し、レーザースポットの三次元座標を求める

30





### 【波浪計測】船側波形のリアルタイム動的計測

NMRI

模型船舶体に導電性塗料センサを塗布した例

導電性塗料センサ(電極)

電気伝導性の塗料をセンサ(電極)として使用することで曲面への設置が自由になり、船側表面の水位計測が可能となる。

図11 導電性塗料による電極

### 【波浪計測】船側波形のリアルタイム動的計測

NMRI

動画

動画

水位変動計測例

導電性塗料相対水位計  
リアルタイム水位表示例  
(Bulkер模型)

### 【波浪計測】船側波形のリアルタイム動的計測 (実船への応用)

NMRI

船側相対水位計

噴水計 → 載荷重量, トリム

船体揺み計 → 重量分布, 慣動半径

### 【波浪計測】船側波形のリアルタイム動的計測 (実船への応用)

NMRI

#### 実海域性能のモニタリング

荷役中の計測

- 船側波形の多点計測 → 噴水計 → 載荷重量
- 船側波形の多点計測 → 船体揺み計 → 重量分布 → 慣動半径

航海中のリアルタイム計測

- 船体6自由度運動計測 → 船体応答関数
- WaveX等の波浪計 → 参照情報

船体応答関数

- 実海域波浪場逆算
- 実海域性能推定
- 実績値との比較

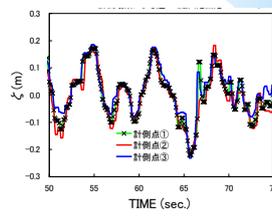
整理・蓄積 → 実海域性能 DB

### 【波浪計測】実船計測（画像の利用）

撮影:Sony 家庭用デジタルビデオカメラ  
 検出ポラリティ:ポジティブ、2値化レベル:自動、2値化方式:Binary  
 計測範囲:Width、位置計測(Upper, Upper, Upper)

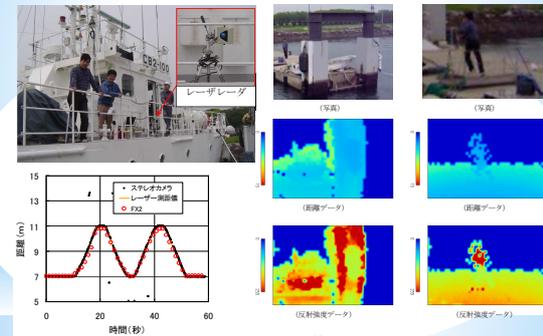


NR	TH	R150	R150	R170	Max	H
CH1	Upper	X = 108	Y = 114			
CH2	Upper	X = 338	Y = 236			
CH3	Upper	X = 272	Y = 361			



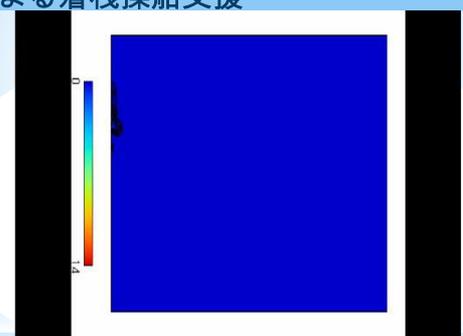
43

### 【その他の計測技術】レーザーレーダによる着棧操船支援



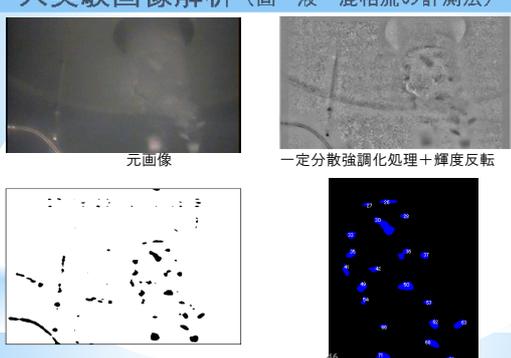
44

### 【その他の計測技術】レーザーレーダによる着棧操船支援



45

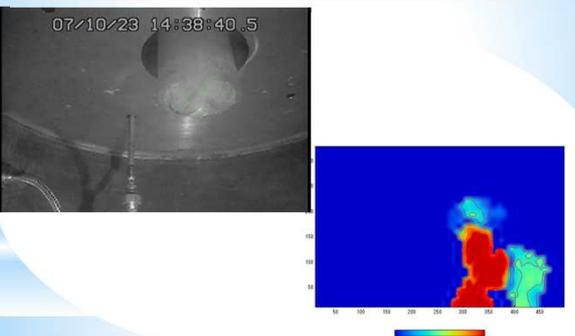
### 【その他の計測技術】CO2スラリー投入実験画像解析（固・液 混相流の計測法）



ラベルNo.	面積
28	116
30	570
33	177
35	191
36	206
37	164
42	162
49	235
50	368
54	104
57	116
62	220
63	239
68	260
71	516
72	436

46

### 【その他の計測技術】CO2スラリー投入実験画像解析（解析結果 動画）



47

### 【その他の計測技術】屈折率整合

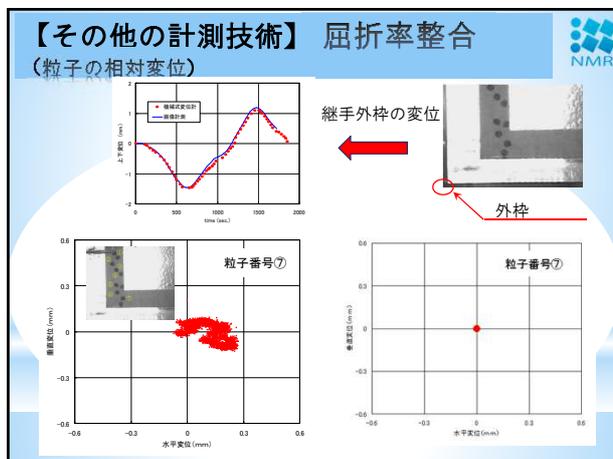
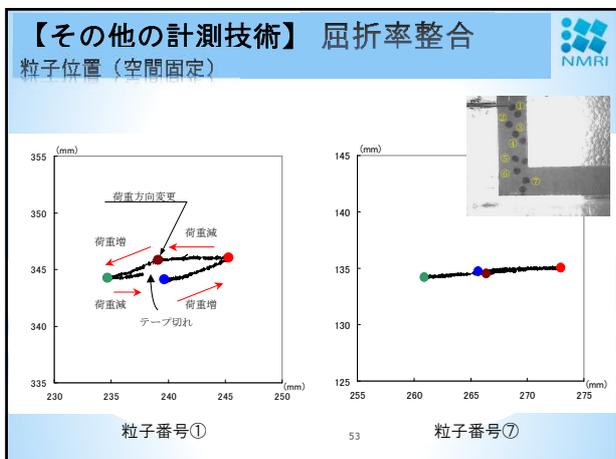
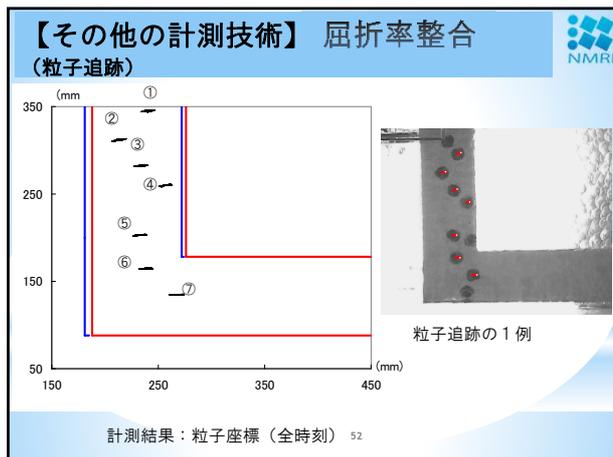
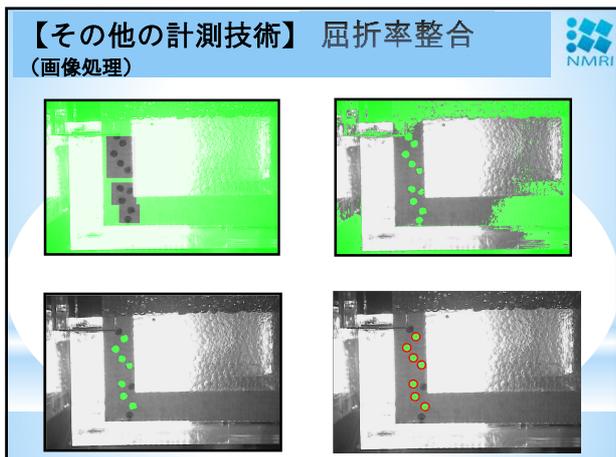
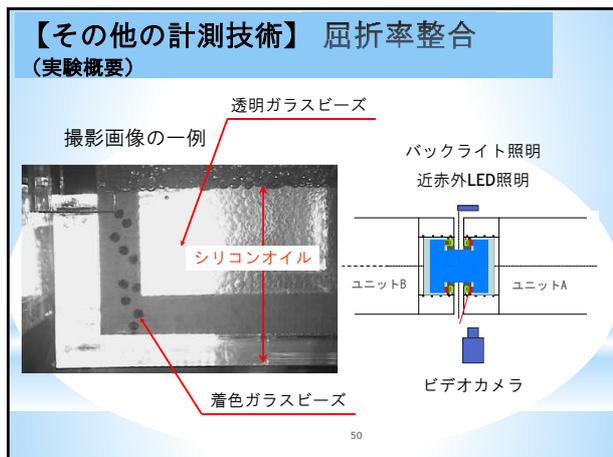
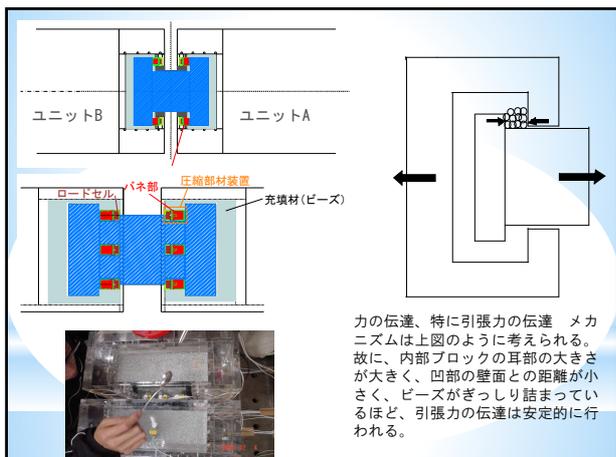
（球状体および球状体群の挙動の実験的検討） 星野邦弘 吉田宏一郎

【目的】  
 機械式継手の実験でガラスビーズ群の特定固体を追尾し、移動経路・速度を計測する技術の適用性を試行するとともに、荷重の増大に伴うビーズ群の移動を視覚的に把握する。

【実験技術】  
 屈折率マッチングによる内部充填粒子内部の可視化



48



### 【その他の計測技術】 屈折率整合 (水槽試験への応用)

例えば、回転するプロペラやダクト、舵等を作用流体中で見えなくして、内部の流れや、回転するプロペラ周りの流れを計測する。

### 【その他の計測技術】 超音波技術

On examination of the detection method of leakage oil from sunken ship and quantity of the remained oil using ultrasonic wave

Kimihito HOSHINO, Michio SHIMADA, Shoichi HARA, Kazuo HITOMI, Michihiro KAMEYAMA, Hiroshi YAMANOUCHI, Nobuo KIRIYA, Toshifumi Hori, Masahiko SASANO and Kenjiro HIKIDA  
National Maritime Research Institute  
Tokyo, Japan

Naoki NIIDA, Masahiro TAKEI  
College of Science & Tech, Nihon University  
Tokyo, Japan

### 【その他の計測技術】 超音波技術 (重油の場合)

- ① Ultrasonic probe
- ② Scanning tank
- ③ Acrylic or steel tank
- ④ Pulse and receiver
- ⑤ Scanning control equipment
- ⑥ Picture monitor

### 【その他の計測技術】 超音波計測技術 (水中漏洩油の計測)

### 【その他の計測技術】 超音波計測技術 (魚ロボットの動き)

### 【これから】 多次元高精度水槽 (3次元空間+時間)

1. 水槽試験(EFD)と数値計算(CFD)は研究を行う上で両輪をなす
2. 数値試験水槽等の出力結果を詳細に検証する水槽試験実験データの高度化を実現する。(多次元同時計測)
  - 模型船体や船体付加物まわりの流場 (3次元PIVやPTV等の3次元3成分流場計測)
  - 模型船体表面の圧力分布 (光ファイバー-FBG等による面的圧力分布計測)
  - 模型船まわりの波高分布 (各種3次元計測法)
  - 模型船の3次元運動計測

ご清聴ありがとうございました。